

# 基于 MSURF 算法的 PCB 图像配准

黄靖<sup>1,2</sup>, 陈小勇<sup>1</sup>, 罗堪<sup>1,2</sup>, 季雨枫<sup>1</sup>, 何松<sup>1</sup>, 林龙彬<sup>1</sup>, 李俊男<sup>1</sup>

(1.福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118;

2.福建省工业集成自动化行业技术开发基地, 福建 福州 350118)

**摘要:** 针对 PCB 板缺陷检测中用传统 SURF 算法进行图像匹配精度不高的问题,提出一种生产工序中运动平台机械误差先验信息与 SURF 特征提取相结合的 MSURF 配准算法。通过提取计算 SURF 特征点,求出对应特征点对的距离;在 PCB 运动平台机械误差分析的基础上,依据先验阈值边界条件剔除异常匹配特征点对;求出两幅图像满足最小二乘拟合准则的映射关系,并将其用于图像配准。在机械运动误差 0.05~0.10 mm 范围内对 42 mm×42 mm 的 PCB 图像配准实验,结果表明:提出的图像配准方法速度快、精度高,适用于产线 PCB 缺陷检测。

**关键词:** PCB 配准; 特征提取; SURF

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)03-0275-06

## A modified SURF algorithm for PCB image registration

HUANG Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoyong<sup>1</sup>, LUO Kan<sup>1,2</sup>, JI Yufeng<sup>1</sup>, HE Song<sup>1</sup>, LIN Longbin<sup>1</sup>, LI Junnan<sup>1</sup>

(1.School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Technology Development Base of Fujian Industrial Integration Automation Industries, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Aiming at the low accuracy of the traditional SURF algorithm in image matching for PCB board defect detection, a modified SURF registration algorithm was proposed that combined the prior information of the mechanical error of the motion platform and the SURF feature extraction in the production process. Firstly, the distance between the corresponding feature point pairs was obtained by extracting and calculating the SURF feature points. Secondly, based on the mechanical error analysis of the PCB motion platform, the abnormal matching feature point pairs were screened according to prior threshold boundary conditions. Finally, the mapping relation of two images satisfying the least square fitting criterion was obtained and used for image registration. The results of the 42 mm×42 mm PCB image registration experiments conducted with the error range of mechanical motion controlled to be 0.05~0.10 mm indicate that the image registration method proposed is fast and accurate, thereby suitable for PCB defect detection in production.

**Keywords:** PCB registration; feature extraction; SURF (speeded up robust feature)

随着电子技术的发展,PCB 板尺寸越来越小,密度越来越高,仅靠人眼进行产品质量检测已无法满足实际检验需求。近年来基于图像处理

技术的快速发展,通过机器视觉实现对 PCB 缺陷检测已成为一个研究热点<sup>[1]</sup>。基于机器视觉的 PCB 缺陷检测较传统人工检测有效率高、准确度

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 福州市科技局项目 (GY-Z17062); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划 (17-491)

第一作者简介: 黄靖 (1975-), 男, 上海人, 副教授, 研究方向: 电力电子与电力传动及电气控制工程。

高、生产成本低等优点。

PCB 图像配准是机器视觉检测 PCB 缺陷的关键步骤,配准算法将直接影响整个检测系统的速度及准确度。

目前图像的配准技术主要分为两类<sup>[2]</sup>:(1)基于图像灰度相似性的方法:该类方法是直接利用整幅图像的灰度度量两幅图像之间的相似性<sup>[3]</sup>。然后,采用搜索方法寻找使相似性度量最大或最小值点,从而确定两幅图像之间的变换模型参数。该方法常使用的测度包括互相关(CC)<sup>[4]</sup>、互信息(MI)<sup>[5]</sup>、平方和差<sup>[6]</sup>等,通过这些度量也可知道图像配准的精度。该类方法虽然配准精度较高,但是计算速度较慢。(2)基于特征的方法<sup>[7]</sup>:这种方法需要在图像中提取特征,通过局部特征点之间而不是整幅图像灰度相似性的方式来提供对应关系。该方法的配准精度取决于特征点的提取和匹配的准确性<sup>[8]</sup>。许多学者针对该类配准方法开展了相关的理论和应用研究<sup>[9]</sup>。David Lowe 在尺度空间理论<sup>[10]</sup>基础上,提出了尺度不变特征转换 SIFT (scale-invariant feature transform) 算法<sup>[11]</sup>。SIFT 算法提取的图像特征具有旋转不变性、放缩不变性、亮度不变性<sup>[12-13]</sup>。但该方法在提取过程中数据量大,实时性较差。Herbert Bay 简化了 SIFT 算法,并提出了 SURF (the Speed up robusted feature) 算法<sup>[14]</sup>。由于采用模板对图像加减运算滤波简化了计算, SURF 在保持 SIFT 优点的同时,增强了抗噪能力,并降低了特征点提取的计算量<sup>[15]</sup>,采用 SURF 算法提取特征点进行匹配时,当检测图像的细节比较丰富时,提取特征点的数量较大而且分布不均匀,导致后续特征描述和匹配的时间大幅增加,同时误匹配的数量也会增加,匹配效果变差<sup>[16]</sup>。SURF 算法及其变种算法在较多场景都有较好的应用,但由于原始算法对特征点对匹配依赖较敏感<sup>[17]</sup>,要较好的平衡定位精度和速度,还需要结合算法特征点对的匹配设置过滤条件。

针对 PCB 图像配准速度和精度的要求,本文提出了结合距离筛选的改进 SURF (modified SURF, MSURF) 配准算法,该算法通过已知系统的机械误差范围设定特征点对距离设置阈值来剔除错误的匹配特征点对,从而减少误匹配,并在实际 PCB 缺陷检测上进行了实验验证。

## 1 PCB 缺陷检测系统

### 1.1 PCB 缺陷检测系统硬件平台

硬件平台结构如图 1 所示。包括:(1) CMOS 工业相机,(2) C 接口镜头,(3) 光源。相机位于待检 PCB 正上方,通过镜头采集待检测 PCB 图像;光源布置于相机四周用于控制光照的强度,保证采集到的待检测图像光照的一致性。(4) 二维步进电机运动平台于相机下方,用以传送待检测的 PCB 板到检测区域;(5) 待检测 PCB。

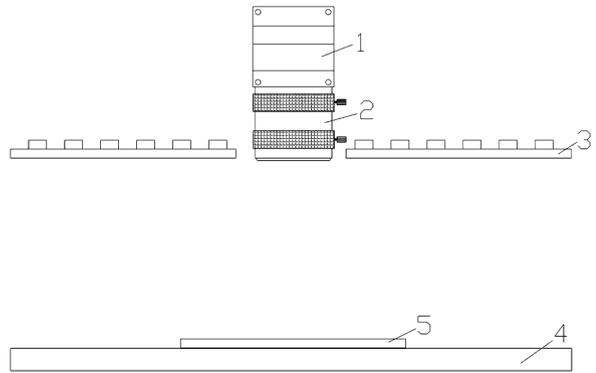


图 1 系统硬件结构图

Fig.1 System hardware structure

### 1.2 PCB 缺陷检测流程

PCB 缺陷检测流程如图 2 所示。首先采集待检测 PCB 图像,然后将其与模板进行配准,通过待检测图像与模板图像进行减法运算可以对待检测 PCB 板进行快速缺陷分析。其分析可包括

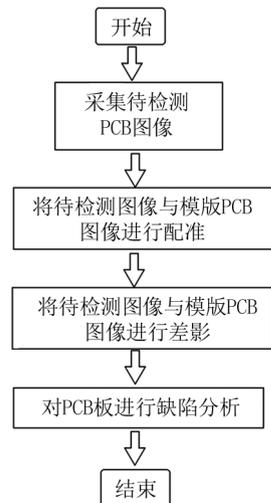


图 2 PCB 缺陷检测流程图

Fig.2 Flowchart of PCB defect detection

确定是否存在缺件、缺少丝印等功能。

## 2 MSURF 配准算法

PCB 图像配准是 PCB 缺陷检测的关键步骤,如果配准精度存在较大误差,将会影响整个检测系统准确性。为了实现准确快速的定位,本文在 SURF 特征点提取的基础上,进一步提出了 MSURF 特征点匹配算法。

### 2.1 SURF 的特征点提取

传统的 SURF 通过引入了积分图像和箱式滤波器,优化了 SIFT 特征点搜索过程,实现快速配准。SURF 特征点提取包括 3 步骤:

(1) SURF 特征点检测。这 1 步骤主要运用了 Hessian 矩阵,其表达式为:

$$H(f(x,y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$x, y$  分别代表像素坐标,  $f(x,y)$  表示图像中的每个像素的灰度值,通过对每个方向求二阶偏导数得到矩阵  $H$ 。

为了使特征具有旋转和尺度不变性,算法通过构造近似代替高斯二阶导数的 BOX-Filter(方框滤波器)对图像进行尺度空间变换,由此 Hessian 矩阵变为:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $D_{xx}$  是图像中  $f(x,y)$  通过 BOX-Filter 得到结果( $D_{xy}$  和  $D_{yy}$  具有相同的含义)。通过该矩阵可以得到每个像素点的特征值。

如图 3 所示在不同的尺度上检测点(以标记为叉号的像素点为例),通过增加滤波器的大小来建立不同尺度下的“斑点响应图”。通过判断像素点的特征值,可以确定其是否为特征点。如 Hessian 矩阵的行列式是正的,则其中的特征点是  $3 \times 3 \times 3$  邻域中的局部最大值。

(2) SURF 特征点方向确定。为了使每一个特征点具有旋转不变性要确定特征点的主方向。以上述寻得的特征点为圆心的圆形领域内对各个角度求解  $x$  和  $y$  两个方向 Haar 小波响应。最后通过 Harr 小波特征的和来确定主方向。

(3) 求取特征点描述算子。描述符的提取可以通过构建选择的主方向上的特征点为中心的矩

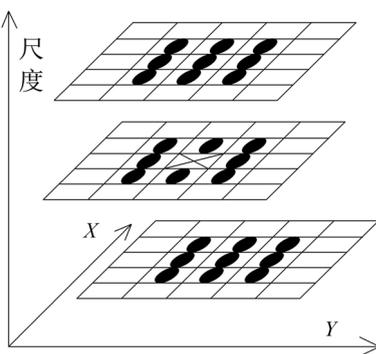


图 3 尺度空间局部极值检测

Fig.3 Local extremum detection in scale space

形区域来执行。如图 4 所示,将该区域分成较小的  $4 \times 4$  个方形子区域。在每个子区域,采用  $5 \times 5$  采样,计算每个采样点的 Haar 小波响应,其中  $dx, dy$  分别代表水平方向和垂直方向 Haar 小波响应。然后  $dx$  和  $dy$  用高斯内核加权。将  $dx$  和  $dy$  ( $\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|$ ) 的每个子区域上的响应及其绝对值相加,构成由  $(4 \times 4) \times 4$  组特征值组成的矢量,形成 64 维的 SURF 描述算子,其中  $\sum dx, \sum dy$  分别表示  $dx$  和  $dy$  在每个子区域上的响应总和,  $\sum |dx|, \sum |dy|$  表示它们的绝对值的总和,最后,将 SURF 描述符归一化为一个单位向量。

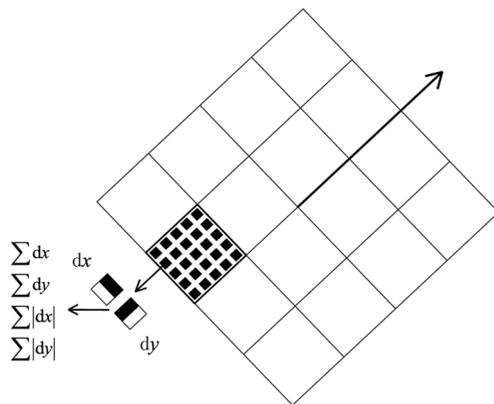


图 4 特征点的主方向及特征向量

Fig.4 The main direction and eigenvector of the feature point

### 2.2 MSURF 特征点匹配

传统的 SURF 特征点匹配算法是通过计算多个匹配点对之间的比值是否满足规定阈值来进行特征点对判定,这种匹配方法简便快捷,但会产生

误匹配。针对 PCB 缺陷检测中的问题,在已知机械系统造成误差范围的先验条件下,本文通过提出了结合先验约束的方式进行 SURF 特征点匹配算法。即通过欧氏距离与设置机械误差范围作为筛选条件确定最终 SURF 特征点。

假设特征点对为  $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ , 则其欧氏距离就定义为:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

首先通过计算每个潜在特征点对之间的欧几里德距离来执行匹配。在这一步,会出现很多特征点对,其中通常包含许多可疑匹配。然后通过设置的机械误差范围  $[D_{\min}, D_{\max}]$ 。若特征点对的欧式距离满足该范围即:

$$D_{\min} < d(x, y) < D_{\max} \quad (4)$$

则匹配成功,否则匹配失败。

特征点匹配及计算变换矩阵  $H$  的步骤如下:

- (1) 从模板 PCB 图像中通过 SURF 算法提取特征点;
- (2) 通过标定将已知的运动平台机械误差范围转换为像素误差范围;
- (3) 采集待检测图像并获取待检测图像的特征点;
- (4) 先通过 SURF 算法对(1)与(3)的特征点进行匹配;
- (5) 计算(4)中匹配的特征点对的欧式距离;
- (6) 通过(2)中得到的像素误差对(5)中匹配的特征点对的距离进行判定,若距离不满足像素误差的阈值范围则为无效匹配点。反之则有效;
- (7) 最后通过筛选出的匹配点对;
- (8) 采用最小二乘法拟合匹配特征点求出待检测 PCB 图像相对模板图像的变换矩阵。

### 3 实验结果与分析

为了验证本算法特征点匹配的准确性、配准的速度性能和配准精度是否满足 PCB 缺陷检测要求,本文分别进行了特征点匹配实验并采用欧式距离标准差、方差、计算速度和互信息度 4 个测度对实验结果进行了评价。所有实验均在安装了 matlab 软件系统的台式工控计算机(i7 4700, 8 G 内存)下进行。采集系统硬件包括了 MQ042CG-CM 工业相机和 HK3514MP5 35 mmC 口镜头,光源为自制平板可调色光源,以及 AMC4030XY 轴

伺服步进运动控制平台构成。检测 PCB 板的尺寸为 42 mm×42 mm。为了便于算法评价,截取了 800×800 的兴趣区进行实验。对机械运动误差在 0.05~0.10 mm 范围内的图像进行了 100 次模板对准实验,提出算法中的机械误差阈值参数设为 450。MSURF 算法与原始的 SURF 配准算法实验结果进行了对比。

其中图 5 为传统的匹配算法和 MSURF 算法在待检测图像随机进行 X、Y 轴平移之后,统计得到匹配特征点对分布的欧氏距离范围,可见与传统的特征点匹配算法相比本算法经过机械误差阈值筛选后其匹配的特征点对距离都在正常范围内,无过大偏差。相应的距离的标准差、方差如表 1 所示,可见本文采用的 MSURF 匹配算法在方差和标准差上都远小于传统算法。并且通过表 1 可见虽然计算速度有所降低,但是本文采用的 MSURF 配准算法互信息度远高于传统算法。多次实验结果表明,与传统方法相比,提出的 MSURF 的时间无明显增加,平均方差和互信息度结果也证明了提出算法在准确匹配一致性上较好。

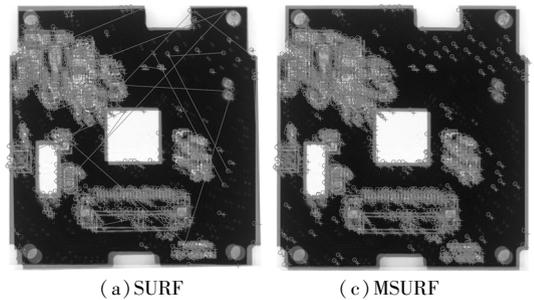


图 5 PCB 特征点匹配图

Fig.5 PCB feature point matching

最后本文对机械误差为 0.1 mm 的待检测图分别用 SURF 算法和提出的 MSURF 算法进行特征点匹配,结果如图 6 所示。在相机参数固定,运动控制平台误差范围已知的情况下,可以看出传统的 SURF 算法出现了多个错误匹配的特点对,无法实现准确的图像对准。MSURF 算法由于采用了误差先验信息进行约束,删除了对不满足约束条件的特征点对无显著的误匹配,最终通过配准形成的图像减法运算效果图如图 7 所示,传统的算法无法对 PCB 缺陷进行检测,而通过本文采用的 MSURF 算法进行配准后的减法运算可以有效识别 PCB 板存在无焊盘的缺陷。

表 1 PCB 配准 100 组结果比较

Tab.1 Result comparison of 100 groups of PCB registration

参数	特征点距离标准差	特征点距离方差	平均用时/ms	平均互信息度
SURF	$3.550\ 2 \times 10^4$	$1.260\ 4 \times 10^9$	259.6	0.119\ 9
MSURF	$1.120\ 4 \times 10^2$	$1.255\ 5 \times 10^4$	296.3	2.954\ 0

本算法可准确的检测到待检测 PCB 板测试样品缺少焊盘。实验结果表明,提出的约束条件可以有效提升算法的匹配精度。

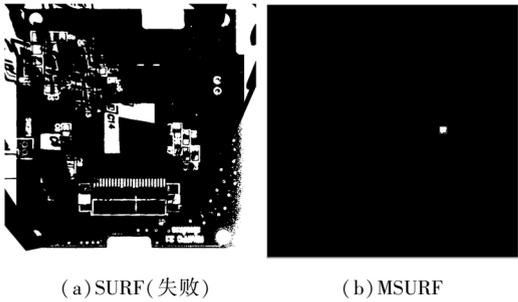


图 6 PCB 配准缺陷检测结果

Fig. 6 Defect detection results with PCB registration

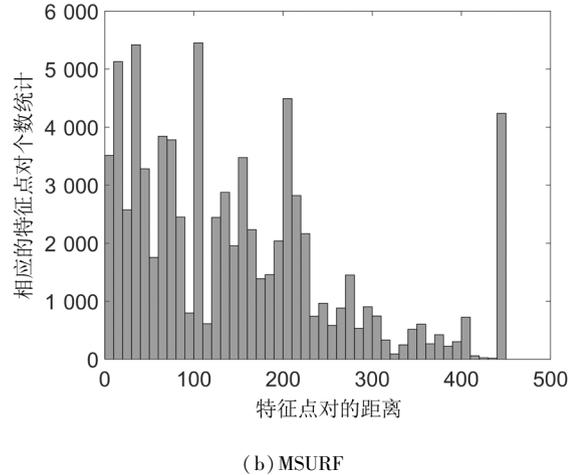
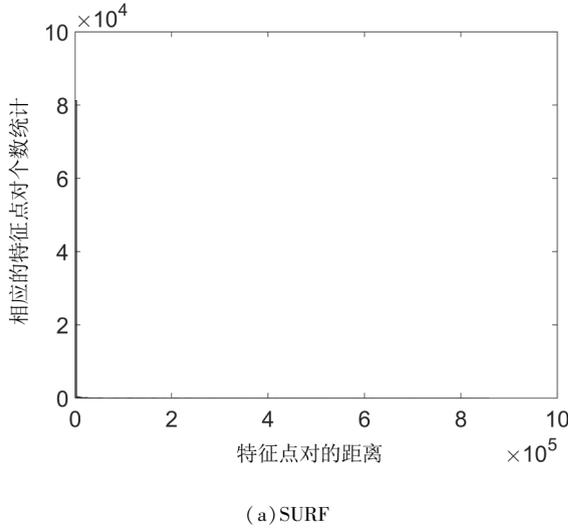


图 7 匹配特征点欧氏距离及相应个数

Fig. 7 Euclidean distance and corresponding number of matching feature points

### 4 结论

针对 PCB 板生产检测工序中关于配准的实际工程问题,提出了利用运动平台的机械误差先验信息作为约束,与 SURF 特征结合的 MSURF 配准算法。利用机械误差筛选错误匹配点对,在良好的特征匹配点上采用最小二乘拟合获得变换关系实现图像的配准。实验结果证明本文采用的 MSURF 配准算法配准效果理想精度高,适用于 PCB 缺陷检测中图像配准及缺陷检测。

### 参考文献:

[1] 王耀南, 刘良江, 周博文. 一种基于混沌优化算法的 PCB 板元件检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 411-415.  
 [2] XIA R, ZHAO J, LIU Y. A robust feature-based registration method of multimodal image using phase congruency and coherent point drift[C]. Mippr; Pattern Recognition & Computer Vision, SPIE, 2013, 8919: 401-410.  
 [3] ZHANG J, WANG J, WANG X, et al. Multi-modal image registration with joint structure tensor and local entropy[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2015, 10(11): 1765-1775.  
 [4] ROCHE A, MALANDAIN G, PENNEC X, et al. The correlation ratio as a new similarity measure for multimodal image registration[C]. International Conference on Medical Image Computing & Computer-assisted Intervention, 1998, 1496: 1115-1124.  
 [5] MAES F, COLLIGNON A, VANDERMEULEN D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information[J]. IEEE Trans Med Imaging, 1997, 16(2): 187-198.

- [6] KAO S C, HO C. Monitoring a process of exponentially distributed characteristics through minimizing the sum of the squared differences[J]. *Quality & Quantity*, 2007, 41(1): 137-149.
- [7] CHEN J, TIAN J. Real-time multi-modal rigid registration based on a novel symmetric-SIFT descriptor [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2008, 19(5): 643-651.
- [8] BARRERA F, LUMBRERAS F, SAPPA A D. Multispectral piecewise planar stereo using Manhattan-world assumption[J]. *Pattern Recognition Letter*, 2013, 34(1): 52-61.
- [9] 侯北平, 朱文, 马连伟, 等. 基于形状特征的移动目标实时分类研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 1819-1825.
- [10] LINDEBERG T. Edge detection and ridge detection with automatic scale selection[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 30(2): 117-154.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [12] 王永明, 王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [13] 傅卫平, 秦川, 刘佳. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(1): 163-169.
- [14] 郑永斌, 黄新生, 丰松江. SIFT 和旋转不变 LBP 相结合的图像匹配算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(2): 286-292.
- [15] BAUER J, SUNDERHAUF N, PROTZEL P. Comparing several implementations of two recently published feature detectors [C]. *Proceedings of the international conference on intelligence and autonomous systems*, Toulouse, France, 2007.
- [16] 高素青, 谭勋军, 黄承夏. 一种基于 SURF 的图像配准改进算法[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(4): 372-376.
- [17] 陈艺虾, 孙权森, 徐焕宇, 等. SURF 算法和 RANSAC 算法相结合的遥感图像匹配方法[J]. *计算机科学与探索*, 2012, 6(9): 822-828.

(特约编辑: 黄家瑜)

(上接第 270 页)

- [16] 王宪保, 何文秀, 王辛刚, 等. 基于堆叠降噪自动编码器的胶囊缺陷检测方法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(2): 64-67.
- [17] VIKTOR S, STEVEN V. Hyperspectral image Classification with convolutional neural networks[C]. *Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Multimedia (MM' 15)*. 2015: 1159-1162.
- [18] PaginaDel Usuario. Grupo de Inteligencia Computacional. Universidad del Pais Vasco[Z/OL]. [http://www.ehu.es/ccwin-tco/index.php?title=Conjuntos\\_de\\_datos\\_3D](http://www.ehu.es/ccwin-tco/index.php?title=Conjuntos_de_datos_3D). 2008.
- [19] BAUMGARDNERMF, BIEHLL, LANDGREBEDA. Landgrebe. Band AVIRIS Hyperspectral Image Data Set[Z/OL]. <https://purr.purdue.edu/publications/1947>. 1992.
- [20] FOSTERD H, Amano K, FOSTERMJ. Hyperspectral Images of Natural Scenes[Z/OL]. [http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/d.h.foster/Hyperspectral\\_images\\_of\\_natural\\_scenes\\_02.html](http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/d.h.foster/Hyperspectral_images_of_natural_scenes_02.html). 2002.

(特约编辑: 黄家瑜)